



1995年(第11回)

日本国際賞 記念講演会

1995(11th)

JAPAN PRIZE Commemorative Lectures

財団法人 国際科学技術財団

THE SCIENCE AND TECHNOLOGY FOUNDATION OF JAPAN

1995年(第11回)

日本国際賞 記念講演会

1995(11th)

JAPAN PRIZE Commemorative Lectures

平成7年4月26日(水) 14:00～17:00

イイノホール

14:00-17:00, April 26th(Wed.), 1995

Iino Hall

ごあいさつ

人類の平和と繁栄は、すべての人にとって共通の願いです。そのために科学技術の果たす役割は極めて大きなものがあります。

当財団は、科学技術の進歩をめざし、日本国際賞による顕彰を行うとともに、科学技術に関する知識及び思想の総合的な普及啓発の事業を行っており、その一つとして、毎年日本国際賞週間中に、日本国際賞受賞者による記念講演会を催しております。

日本国際賞は、科学技術の研究で独創的・飛躍的な成果を挙げ、科学技術の進歩に大きく寄与し、人類の平和と繁栄に著しく貢献したと認められる人に贈られる賞で、1985年にその第1回の授賞が行われました。

第11回を迎えた本年は、材料プロセス技術分野では、

ニック・ホロニアック・ジュニア博士（アメリカ合衆国）

イリノイ大学・センター・フォア・アドバンスド・スタディー
教授、ジョン・バーディーン職教授

環境保全重視の農林水産科学・技術分野では、

エドワード・F・ニプリング博士（アメリカ合衆国）

フロリダ州立大学名誉教授、元米国農務省農業研究部昆虫
研究部長

の両博士が受賞されます。

今回の記念講演会には、この両博士をお招きして講演をしていただきます。「日本国際賞記念講演会」は、科学技術に関心をもつ一般の方々に受賞者が直接語りかけるパブリックスピーチの場として設定したもので、この講演会を通じて、多くの方、とくに次代の科学技術を担っていくであろう方々が多くの示唆をつかんでいただければ幸いに存じます。

1995年4月

財団法人 国際科学技術財団

理事長 近藤次郎

Message

Peace and prosperity are fundamental human aspirations, and the role that can be played by science and technology towards these ends is vast.

For the development of science and technology, The Science and Technology Foundation of Japan presents Japan Prize to promote the comprehensive spread and development of science and technology. Commemorative Lectures by the Prize Laureates are held annually during the Japan Prize Week.

The Japan Prize honors those who are seen to have made original and outstanding achievements in science and technology, and thus to the peace and prosperity of mankind.

The first Japan Prize was presented in 1985.

This year, 1995, the 11th Japan Prize will be presented to the following two laureates:

Category: Materials Processing Technologies

Laureate: Dr. Nick Holonyak, Jr. (U.S.A.)

Professor, Center for Advanced Study,

John Bardeen Chair Professor, University of Illinois

Category: Science and Technology for Agriculture, Forestry and Fishery which conserves the Environment

Laureate: Dr. Edward F. Knipling (U.S.A.)

Professor Emeritus, Florida State University,

Former Director, Entomology Research Division,

Agricultural Research Service

The two laureates have been invited to give Commemorative Lectures to the general public.

We sincerely hope that these Lectures provide inspirations and encouragement to those who will be leaders in science and technology in future generations.

Prof. Jiro Kondo

Chairman

The Science and Technology Foundation of Japan

講演会プログラム

PROGRAM

14:00

開会
主催者挨拶
近藤次郎 国際科学技術財団理事長

14:00

Opening Remarks
Prof. Jiro Kondo
Chairman
The Science and Technology Foundation of Japan

14:10

受賞者紹介
井口洋夫 岡崎国立共同研究機構長

14:10

Introduction of the Laureate
Dr. Hiroo Inokuchi
President
Okazaki National Research Institutes

14:20

記念講演
ニック・ホロニアック・ジュニア博士
「シリコンから化合物半導体へ：
発光ダイオード及びランプ」

14:20

Lecture: "From Si to Alloy Compound
Semiconductors: The Light Emitting Diode and
Lamp"
Dr. Nick Holonyak, Jr.

15:20

休憩 (20分)

15:20

Break (20 min.)

15:40

受賞者紹介
原田 宏 筑波大学副学長

15:40

Introduction of the Laureate
Dr. Hiroshi Harada
Vice-President
University of Tsukuba

15:50

記念講演
エドワード・F・ニプリング博士
「不妊虫放飼法およびその他の
生物的方法による害虫の広域制御」

15:50

Lecture: "Areawide Management of Insects by The
Sterile Insect Technique and Other Biological
Means"
Dr. Edward F. Knipling

16:50

閉会

16:50

Closing

1995(第11回)日本国際賞受賞者 1995(11th) Japan Prize Laureate



ニック・ホロニアック・ジュニア博士
(アメリカ合衆国)

Dr. Nick Holonyak, Jr.
(U.S.A.)

イリノイ大学・センター・フォア・
アドバンスド・スタディー教授、
ジョン・バーディーン職教授

Professor, Center for Advanced
Study, John Bardeen Chair
Professor, University of Illinois

材料プロセス技術分野

授賞対象業績：

化合物半導体の物理的原理の洞察及びプロセス技術に基づく創造的業績を通しての発光ダイオード及びレーザーなど、オプトエレクトロニクスにおける基礎研究並びに実用化に対する顕著な貢献

Materials Processing Technologies

Reasons for Award:

For outstanding contributions to research and practical applications of light emitting diodes and lasers through pioneering achievements in the understanding of physical principles and in the process technology of intermetallic compound semiconductors.

イリノイ大学教授 1928年11月生まれ

ホロニアック博士は、1951年以来半導体プロセス技術の研究を続け、現在世界中で使われているシリコン・コントロールド・レクチファイアを開発した。

1960年以降、自ら開発した化合物半導体プロセス技術による発光ダイオードを、また1962年には可視光の半導体レーザーの実現に世界で初めて成功した。

その後、半導体の禁制帯幅並びに格子定数を独立に制御するなど今日のオプトエレクトロニクスの道を拓き、初めて高性能な室温連続発振の量子井戸構造レーザーの開発にも成功した。以上のように、同博士は、世界を変えたオプトエレクトロニクスにおける基礎研究及びその実用化に抜群の貢献をした。

Dr. Nick Holonyak, Jr. started his research on semiconductor process technology in 1951. In 1957 he made great contributions in the areas of silicon devices, including his invention of the Silicon Controlled Rectifier(SCR). SCRs are now widely used in the world.

Since 1960 he focused his research on intermetallic compound semiconductors, and he tried unique methods in process technology for crystal growth and p-n junction formation. His outstanding work from 1960 to 1962 led to the commercial introduction of GaAsP light emitting diodes(LED). He was the inventor of the first practical LED. In 1962 he succeeded in making the first visible light semiconductor laser.

He extended his research to develop ternary and quaternary compound semiconductors, and he was the first to succeed in independently controlling two factors, i.e., energy gap and lattice constant for preparing devices. This achievement was a key contribution to the growth of modern optoelectronics.

He was the first(1978) to achieve continuous room temperature operation of a laser with quantum-well-structure.

Dr. Holonyak's outstanding achievements ranging from research to practical developments on light-emitting diodes and lasers gave continuous stimulus and remarkable enrichment both to related physics and technology.

シリコンから化合物半導体へ：発光ダイオード及びランプ ニック・ホロニアク・ジュニア

BardeenとBrattainによってトランジスタが発見され（1947年12月16日）、又Bardeenによって少数キャリアの注入が確立されて以来、半導体が集中的に研究され又実際現在我々を取り巻いている集積回路（ICs）やコンピュータを含む全く新しい驚くべきエレクトロニクスの基礎として役立つ様になる事が実質的に自然の成り行きとなったのである。最初はBardeenの慎み深さから当時のトランジスタは原価が高いために或種の特定の応用に対しては有用になるだろうが、低価格の真空管が使われている広い用途に対しては競争にならないだろうと考えていた。私達は今この初期の慎み深い意見に対して微笑むことが出来る。Bardeenは又彼が死ぬ少し前に次の様に話していた（Holonyakに）。1952年9月に創設したかつての彼のUrbanaの半導体研究室で仮に間違いがあったとしても、それでも結晶と種々の材料に関する研究にそれ以上力を注ぐという事にはならなかったであろう。この事は彼が1952年2月にノート・ブックに書いた様に、SiはGeよりもっと重要であり、又単一表面、単一の参照面からの不純物拡散がトランジスタを作る「正しい」道である事を彼が知っていた事を考え合わせると皮肉な事である：事実この研究所では不純物拡散更に反転層の量子サイズ効果を含む表面及び界面の研究が行なわれた。Bardeenは電界効果デバイスの反転層の利用に関する基本特許を持っていた事を述べるのは有意義な事と思う（トランジスタの特許がファイルされる以前にファイルされている）。この事は表面チャンネルに於ける電荷注入及び後の量子サイズ効果を確立する際に彼が何故間違いをおかさなかったかを考えるヒントになる。

当時結晶を開発する初期の段階であった

為に、初期のトランジスタの研究は元素材料であるGe及びSiをもとにしたものになったのは避け難い事であった。こうしてこれらの間接遷移ギャップ（長いキャリア寿命）を持つ結晶が最初に研究される様になった。Siの場合についていえば、これらの研究は私達が知っている様に今でも続いている。例えばSi上の酸化膜とそのトランジスタへの利用が40年間も続いている事を私達は知っているし、今でも又これからも更に小さい小さいそして稠密に集積されるデバイスに向かって、おそらく最終的には量子サイズ効果の段階に達する迄継続され拡大さえするだろうと思われる。私達はこの事が如何に重要であるか分かっており、勿論、酸化膜で規定したSiデバイスについて一度でも仕事をした事のある私共すべての人々の大きな誇の源である。

トランジスタに関する結晶と材料の研究の中から、縮退したドーピングでは急峻なp-n接合がトンネル現象を起こし、負性抵抗を示す事がSonyで（1958年、江崎）示された。Ge及びSiのトンネル・ダイオードの限界からIII-V族半導体及びその材料の研究が興味を集める事になり、実際、それは直接的にIII-V族の気相エピタキシー（VPE）を、そして高いp-n接合電圧を求めて早くも1960年にはGaAs_{1-x}P_xの気相合成によるエピタキシーを招来させる事になった。・・・時あたかも、実際、エピタキシャルGe及びSiトランジスタが最初に開発された時の事である。

基本概念である「injection」（キャリア注入）の確認によって、ようやく電流駆動の半導体（初期のSiC）が何故光を発するのかを理解出来る様になった。これは古くてしかもよく分かっていなかった現象であった。III-V材料への興味の転換（1959-60）とこれ

らの系でのp-n接合の研究（トンネル接合、可変容量素子など）は又III-V発光素子の研究へとその方向を向ける事になった。一研究学派は50年代後半及び60年代初期にそのエネルギー・ギャップが大きい（2.26eV、緑）という理由によって、その間接遷移ギャップ・バンド構造とその効率の悪さを無視してGaPの研究に焦点を合わせた。他の研究者達はエネルギー・ギャップの低さ（1.4eV、赤外）にも拘らず、トランジスタ材料としての将来性を考えてGaAsにこだわった。

Znを拡散したGaAsの可変容量接合素子が光信号伝送に成功裡に使われた時（Rediker他、1962）、Device Research Conference（1962年7月）の一部の参加者達は直接遷移ギャップを持つIII-V結晶、即ちGaAs（或いはGaAs_{1-x}P_xですら！）がレーザーの基盤である事を意味しているものと解釈した。1962年の終りまでに4つのグループがp-n接合半導体レーザーを実現することに成功した（Hall他、GaAs；Nathan他、GaAs；Holonyak GaAs_{1-x}P_x；Quist他、GaAs）。半導体レーザーはそれ自身重要である、しかしそれを越えてこの事は直截的に如何に直接遷移ギャップ半導体が光放出に対して赤外だけでなく可視光に対しても重要であるかを明らかにした。逆に、間接遷移ギャップ結晶（GaP）とその弱いバンド間行列因子はレーザー材料としてあまり有用でない事を証明した事になった。又この事は極めて早い時期にこの材料が発光素子として基本的に弱い事を示したのである。単純にこれは、直接遷移ギャップ結晶が発光素子材料として基本的に秀れている事を示した。

1962年に於ける可視光のGaAs_{1-x}P_xレーザーと最初の現実的発光ダイオード（LED）との実現は、それがどの様に評価されたか

は別として、将来のレーザー及びLED開発の道を示す信号となったのである。

第一に、可視光GaAs_{1-x}P_xレーザーはIII-V化合物半導体は多くの初期の研究者達が間違っただけで考えていた様な本来的に欠陥に満たされた擾乱された系ではない事を証明したのである。又化合物の組成（2）とそのエネルギー・ギャップを変更出来る事を示した事はヘテロ接合を作る為に必要な自由度を与える事になった。こうして早くも1962年にはGaAs_{1-x}P_xの様な直接遷移型化合物はより重要であり、間接遷移型のGaPの様な二元材料はおそらくサブストレートとしての用途以外ではあまり重要ではないという結論を下す事が出来たのである。

では私達は次の基本的な問題を考えてみよう：p-n接合は光を放出する、しかし、それは発光素子にとって如何に基本的なものであるか？それは究極のランプか？この質問に答える為に私達は小さいドープしていない直接遷移ギャップをもつ半導体の板上に光（入射光、 $hw \geq E_g$ ）をあて電子の化学ポテンシャル（ $E_{Fn} \equiv -q\phi_n$ 、電子の擬フェルミ・レベル）を伝導帯の端に、 $E_{Fn} \rightarrow E_c$ 、そしてホールの化学ポテンシャル（ $E_{Fp} \equiv -q\phi_p$ 、ホール擬フェルミ・レベル）を価電子帯の端に $E_{Fp} \rightarrow E_v$ （ $E_c - E_v = E_g$ ）に動かしてみる。私達は電荷の中性が保存されてエネルギー帯が平らになる事（直線）に注目する。理想的な場合には私達は100%の量子効率をもって入射したすべての光子を電子-ホール再結合放射としてとり出す（recover）ことが出来る。この際私達は高い屈折率（ $n \sim 3.5$ ）の半導体から再結合放射をとり出す問題点を無視している。

私達はもう一つの考え方が出来る：サンプリを光励起させ、電子-ホール対を発生

させたのであるから、おそらく過剰の電子とホールを再結合放射でなく電流としてとり出す事が出来るだろう。もしも私達が右側の半導体のn型に、左半分をp型にドーピングして電子とホールの「フェルミ準位の伝導連結」を電子-ホール対に対して作ったならば、(引続き入射光があるとして)この事は可能である。私達はこれをいわば理想的なドナーとアクセプタのイオン注入(中性不純物)の形で光はON状態のままやるとしよう。電子-ホール対を電圧 $V \simeq E_g/q$ に対する電流として引き出す代わりに今作った外部のn及びpの伝導連結に"bucking"電圧、対抗電圧 $V \simeq E_g/q$ をかけてみよう。光が照射されていても電流は流れない。そこで光を消そう。すると光で発生した内部の"太陽電池"電圧を消す事になる。そうすると外部の"bucking"電圧、電池は電源となり、"フェルミ準位伝導連結"を通る電流によって電子-ホール対と供給することになる。これは実際私達の擬-2-準位(E_c, E_v)直接遷移ギャップ量子システムをp-n接合に変えた事になる。

この演習の大切な点は理想的な光励起二準位量子システム、すなわち、単純な光ポンプ型の平坦バンド直接遷移ギャップ半導体光源を他方で全く同一な電流駆動の光源にしてしまう事を示す点にある。私達はごく自然にp-n接合を構築させられる事になったのである。そして勿論、入力電流を加える事によってもう光ポンプの必要性はなくなったのである。p-n接合は、実際、光源の基本的形態であり、本質的には電子-ホール注入電流で(白熱電灯の様な熱によってではなく)直接駆動される二準位量子システムである。勿論、通常のp-n接合は私達が記述して来た様な光源としては単純に過ぎる。

実際にはそれは光吸収をへらす為にn型とp型の入力電流部が("フェルミ・レベル伝導結合")より広いエネルギー・ギャップを持ってそれより狭いエネルギー・ギャップの狭い活性領域をはさむ二重ヘテロ接合の形になっている。又これはこの薄い活性領域($Lz < 1/\alpha$, α は吸収係数、 $\alpha \sim 10^4 \text{cm}^{-1}$)への電子-ホール対の注入をより効率的にし、同時にキャリアを閉じこめ又或程度再結合放射をも閉じこめる役割を果たす様になる(レーザーの様に)。

ここで現代のLED(或いはレーザー)をどの様に実現するかという現実的な問題が残っている。 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ (原型)は直接遷移ギャップ化合物半導体が重要である事、又ヘテロ接合を作る事が出来る事を示す点でその重要性を明らかにすることに貢献したが、その後継材料である $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 及び $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ 更にはこれが改善された $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{P}$ はヘテロ接合を作に更に重要であることを証明した。何故ならば、Al-Gaを置きかえた材料は格子常数を変える事なくエネルギー・ギャップを変化させる事が出来るからである。この事は結晶欠陥を減少させ、従って無効電流によるロスを削減する為に重要である。これらの材料系は一般的な下地材料であるGaAsと適合するし、又更に重要な事はアルミニウムが取り扱えるDupuis型の有機金属化学気相堆積法(MOCVD)の反応装置で経済的に大規模に形成出来る事である。

ここから先は簡単の為に、ただ比較的厚いGaAs下地の上にエピタキシー成長した(MOCVD)赤-オレンジ-黄-緑(ROYG)の $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{P}$ のヘテロ層だけを考えてみる事にする。しかし、GaAs下地はそのエネルギー・ギャップが小さい為に不幸にもROYGの再結合放射に対して強い光吸収体と

して働いてしまう。半導体は、ただ再結合放射を引き起こすだけではない：その外界との間の高い屈折率 ($n \sim 3.5$) (伝達の不整合) の為に、それがあたかも“箱”、容器の様に働いてしまう、それはフォトンをとらえ、その“箱”の中の吸収体すなわち厚いGaAs下地によってそれを消滅させてしまう。私達が真に効率的なLEDを実現しようとするならば、薄い $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{P}$ のヘテロ層が成長しているその下地の厚いGaAsを取り除かなければならない。最近KishとCraford及びその協力者達 (ヒューレット・パカード、1994) はGaAs下地は取り除く事が出来、種々のウェハ-はりつけの“トリック”によってLEDの組立が可能な十分な厚さの光吸収の起こらないGaPのウェハ-に置きかえる事が出来ることを示した。光を吸収しないGaPの土台を使う事によって光出力は200%に増加させる事が出来、今やROY LEDは白熱電灯の明るさをワット当たりルーメンの値で凌駕する事になった。この開発と平行して、同じIII-V気相エピタキシャル結晶成長技術 (MOCVD) で青色の光を発する直接遷移ギャップIII-V材料の $\text{In}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{N}$ ヘテロ接合LEDの構築が可能になった (中村他、日亜、1994)、まだ現在性能は高くないが、それでも今後かなり大きな改善の可能性を残している。この様にして、III-V材料は全可視光範囲に対応出来る (おそらくII-VI材料からの援助を受けつつも)。

これらは注目すべき開発である：30年経って直接遷移ギャップIII-V材料はLED材料として広く世の中に広がった、更に加えて、LEDは白熱電灯よりもすぐれた性能をもっている為にランプとなったのである。照明産業はそれが認識されていると否とに拘らず、

長期的な脅威にさらされているのである。LEDがすべての可能なディスプレイの用途に向けて開発が進み、又全可視光範囲で同等な性能を発揮するまでにはもう少し時間を必要とするだろう。おそらく、完全に仕上がったランプになるまでにはそれ以上の時間が必要とされるだろう。それにも拘らず、事実すでにそれが起り始めている様に、そういう事になるだろう。LEDにとって直接遷移ギャップ材料の持つ特別の重要性が決定的に確立される迄に如何に長い時間が経過したのか、そして一般的にいつて科学的な進歩を重要な技術的進歩に変換するのにどれだけ長い時間が必要とされるのかを考えるのは興味深い事である。又関連した意味に於て、半導体が電子 (-) とホール (+) 伝導の能力を持っており、同時にフォトンが発生し、検出し又処理する能力を持っている為に、半導体はエレクトロニクスの益々広く一般的な材料になって来ており、今や照明と光の世界に侵入し始めているのである。再び最初に掲げた質問に答えよう：p-n接合は究極的なランプである。

最後になるが、Bardeenのキャリア注入の解明 (identification) が、今も続いて居り、今後も長く長く続く様に定められているエレクトロニクス革命の開始を印したものであることは今や明白である。実際、John Bardeenを現代エレクトロニクスのゴッド・ファーザーと考え、エレクトロニクスが存在する限り彼に最大の敬意を払うのは妥当な事である。事実、エレクトロニクス又それが行っているその物の代わりは存在しない。そして私達は常にJohn Bardeenの負債によって誇舞され、又それを負わされているのである。

FROM Si TO ALLOY COMPOUND SEMICONDUCTORS: THE LIGHT EMITTING DIODE AND LAMP

Nick Holonyak, Jr.

After the discovery of the transistor by Bardeen and Brattain (December 16, 1947) and Bardeen's identification of minority carrier injection, it became essentially inevitable that the semiconductor would be studied intensely and would serve as the basis for an entirely new form of electronics, in fact, the wondrous electronics, including integrated circuits (ICs) and computers, now all around us. At first, in his modesty, Bardeen felt that early transistors would, because of their high cost, be useful only in certain special applications but might not be competitive in broad applications with the low cost vacuum tube. We are now able to smile at this honest early opinion. Bardeen also commented not long before his death (to Holonyak) that if there was a mistake made in his old Urbana semiconductor laboratory, which was founded Sept, 1952, it was not to emphasize crystal and materials studies more. This is ironic considering the fact that he knew, and wrote in his notebook at an earlier date (Feb, 1952), that Si was more important than Ge and that impurity diffusion from a single surface, a single reference plane, was the "right" way to make transistors; indeed, impurity diffusion was studied in his laboratory, as well as were surfaces and interfaces, including quantum size effects in inversion layers. It is worth mentioning that Bardeen held the basic patent (filed before the transistor patent) on the use of inversion layers in field effect devices, which gives some hint as to why he did not miss in the identification of carrier injection and later quantum size effects in surface channels.

Because of the primitive state of crystal development, it was inevitable that early

transistor studies would be based on the elemental materials Ge and Si, and thus that material studies on these indirect-gap (long carrier life-time) crystals would come first. In the case of Si, these studies, as we know, continue even now. For example, we have known of the oxide on Si and its use in transistor devices for 40 years, and yet these studies continue and even expand, ever and ever toward smaller and smaller and more densely packed devices, perhaps eventually reaching down to the level of quantum size effects. We understand how important this is, and, of course, this is a source of great pride to all of us who have worked at one time or another on oxide-defined Si devices.

In the crystal and materials studies dealing with transistors, it was shown at Sony (Esaki, 1958) that at degenerate dopings an abrupt p-n junction tunnels and exhibits negative resistance. The limitations of tunnel diodes in Ge and Si immediately made the III-V semiconductors and their materials study interesting, which, indeed, led directly to III-V vapor phase epitaxy (VPE) and, for higher voltage p-n junctions, to VPE $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ synthesis as early as 1960 -- at the time, in fact, when epitaxial Ge and Si transistors were first being devised.

The identification of injection, a fundamental idea, made it possible to understand at last why a semiconductor driven with a current (in the beginning SiC) could emit light, which was an old and poorly understood phenomenon. The turn towards III-V materials (1959-60) and the study of p-n junctions (tunnel junctions, varactors, etc.) in these systems led also in the direction of the study of III-V light emitters.

Ignoring its indirect-gap band structure and poor efficiency, one school of thought in the late 50's and early 60's focused on GaP because of its high energy gap (2.26 eV, green). Others were more concerned with GaAs in spite of its lesser energy gap (1.4 eV, infrared) because of its prospects also as a transistor material.

When a Zn-diffused GaAs varactor junction was used successfully in optical signal transmission (Rediker and co-workers, 1962), some attendees of the Device Research Conference (July, 1962) interpreted this to mean a direct-gap III-V crystal, say GaAs (or even $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$!), could be the basis for a laser. By the end of 1962 four groups succeeded in demonstrating p-n junction semiconductor lasers (Hall, et al., GaAs; Nathan, et al., GaAs; Holonyak, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$; Quist, et al., GaAs). The semiconductor laser is, of course, important in its own right, but beyond that it made clear at once how important a direct-gap semiconductor is for light emission, including visible spectrum and not just infrared. In contrast, indirect-gap crystal (GaP) and its weaker band-to-band matrix element proved to be more or less useless as a laser material, which indicated very early its basic weakness also as a light emitter. Simply put, a direct-gap crystal is fundamentally a better light emitter material.

Whether it was appreciated or not, the demonstration of a visible-spectrum $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ laser in 1962, as well as first practical light emitting diode (LED), signaled the future direction of laser and LED development. First of all, the visible-spectrum $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ laser proved that III-V alloys were not inherently disturbed systems filled with defects, which was a

mistaken belief of many early workers. Also, the tunability of composition(x) and energy gap of an alloy provided the necessary flexibility to make heterojunctions. Thus, as early as 1962 it could be concluded that direct-gap alloys such as $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ were more important and indirect-gap binary materials such as GaP were less important, except perhaps as substrates.

Now we deal with a basic question: a p-n junction emits light, but how fundamental is it as a light emitter? Is it an ultimate lamp? To answer this question, we invert the problem and shine light (excitation light, $h\nu \geq E_g$) on the center of a small rectangular slab of undoped (intrinsic) direct-gap semiconductor and drive the electron chemical potential ($E_{Fn} \equiv -q\phi_n$, the electron quasi-Fermi level) towards the conduction band edge, $E_{Fn} \rightarrow E_c$, and the hole chemical potential ($E_{Fp} \equiv -q\phi_p$, the hole quasi-Fermi level) towards the valence band edge, $E_{Fp} \rightarrow E_v$ ($E_c - E_v = E_g$). We note that charge neutrality is preserved, and the energy bands remain flat (straight). In the ideal case we can recover, with 100% quantum efficiency, all the input photons as electron-hole recombination radiation. At the moment we ignore the problem of removing the recombination-radiation from the high-index ($n \sim 3.5$) semiconductor.

We have an alternative: Since we have photoexcited the sample and generated electron-hole pairs, maybe we can extract the excess electrons and holes as a current and not recombination radiation. This is possible (excitation light still in place) if we make an electron and a hole "Fermi-level conduction-connection" to the electron-hole pairs by doping the right half of the semiconductor n-type and the

left half p-type. We do this, let us say, by some form of ideal donor or acceptor implantation (neutral impurity) with the light still ON. Instead of extracting the electron-hole pairs as a current at voltage $V \sim E_g/q$, let us place a "bucking" voltage, an opposing voltage, $V \approx E_g/q$ across the external n and p conduction connections we have just made. No current flows with the excitation light in place. We turn-off the light, and thus turn-off the light-generated internal "solar-cell" voltage. Now the external "bucking" voltage, a battery, becomes a source and supplies the electron-hole pairs by current flow via the "Fermi-level conduction connections", which, indeed, changed our quasi-two-level (E_C, E_V) direct-gap quantum system into a p-n junction.

The point of this exercise is to show that to make an ideal photoexcited two-level quantum system, i.e., a simple photopumped flat-band direct-gap semiconductor light source, into an otherwise-identical current-driven light source, we have been forced quite naturally into constructing a p-n junction. And, of course, with a current input there is no further need for photopumping. A p-n junction is, in fact, a fundamental form of light source, essentially a two-state quantum system driven directly with an electron-hole injection current (not by heat as in an incandescent lamp). Of course, an ordinary p-n junction is too simple of a light source as we have described it. It should really take the form of a double heterojunction so that the n-type and p-type input current sections ("the Fermi-level conduction connections") are wider in energy gap than the narrower gap thin active region in order to reduce the absorption. Also this makes the electron-hole pair injection into the thin

active region ($L_z < 1/\alpha$, α the absorption coefficient, $\alpha \sim 10^4 \text{cm}^{-1}$) more efficient, as well as confines the carriers and to some extent the recombination radiation (as in a laser).

There remains the practical problem of how to realize a modern LED (or laser). Although $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ (the prototype) served its purpose in showing the importance of direct-gap alloys, and that alloys make possible heterojunctions, the successor alloys $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ modified into $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{P}$ proved to be more important for heterojunctions because Al-Ga substitution allows change in the energy gap without change of the lattice constant. This is important in reducing defects and thus shunt losses. These alloy systems match the common substrate material GaAs, and of further importance can be grown economically at large scale in aluminum-capable Dupuis-style metalorganic-chemical-vapor-deposition (MOCVD) reactors.

In the interest of brevity, we consider further only thin red-orange-yellow-green (ROYG) $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{P}$ heterolayers grown epitaxially (MOCVD) on relatively thick GaAs substrates. Because of its lesser energy gap, however, the GaAs substrate turns out, unfortunately, to be highly absorbing of ROYG recombination radiation. The semiconductor does not just generate the recombination radiation; its high index of refraction ($n \sim 3.5$) relative to the outside world (its transmission mismatch) causes it to act as a "box", a container, that traps the photons and annihilates them with any absorbing substance in the "box", e.g., the thick GaAs substrate. The thick GaAs substrate on which the thin $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{P}$

heterolayers are grown must be removed if we are to realize a truly efficient LED. Recently Kish and Craford and their co-workers (Hewlett-Packard, 1994) have shown that the GaAs substrate can be removed and be replaced, by various "tricks" of wafer bonding, with non-absorbing GaP of sufficient thickness to make LED assembly convenient. The use of non-absorbing GaP platform makes possible as much as a 200% increase in light output so that now ROY LED's exceed, in lumens per watt, incandescent lamps. Parallel with these developments, the same III-V vapor epitaxial crystal growth technology (MOCVD) has made possible the construction of blue-emitting direct-gap III-V $\text{In}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{N}$ heterostructure LEDs (Nakamura, et al. at. at Nichia, 1994) of at present lesser performance but nevertheless considerable potential for improvement. Thus, III-V alloys are able to serve the entire visible spectrum (maybe even receiving help from II-VI alloys).

These are remarkable developments: After over 30 years the direct-gap III-V alloy has prevailed as an LED material and, in addition, has caused the LED, because of its better performance than an incandescent, to become a lamp. The lighting industry, whether it is appreciated or not, has been put under long range threat. It will take some time for the LED to be fully developed in all its possible display uses, and at equal performance across the entire visible spectrum. Perhaps even more time will be required for its conversion into a full-fledged lamp. Nevertheless, it will happen, as, indeed, is beginning to occur already. It is interesting how long it has taken (many decades!) to establish

conclusively the special importance of direct-gap III-V alloys for LEDs, and how much time in general is required to convert scientific advances into important technological advances. It is interesting also how, in a related sense, the semiconductor, with its electron (-) and hole (+) conduction capability, as well as its ability to generate, detect and handle photons, becomes more and more the universal material of electronics, and now even begins to intrude into illumination and lighting. To answer again the question posed earlier: the p-n heterojunction is an ultimate lamp.

Finally, it is clear that Bardeen's identification of carrier injection marked the beginning of a revolution in electronics that still continues, and that is bound to continue much, much longer. It is, indeed, proper to consider John Bardeen the "godfather" of modern electronics and, as long as electronics exists, to hold him in the greatest esteem. In truth, there is no substitute for electronics and what it does, and we will always be inspired by and be in John Bardeen's debt.

1995(第11回)日本国際賞受賞者 1995(11th) Japan Prize Laureate



エドワード・F・ニプリング博士
(アメリカ合衆国)

フロリダ州立大学名誉教授
元米国農務省農業研究部昆虫
研究部長

Dr. Edward Fred Knipling
(U.S.A.)

Professor Emeritus, Florida
State University, Former
Director, Entomology Research
Division, Agricultural Research
Service, USDA

環境保全重視の農林水産科学・技術分野

授賞対象業績：

不妊虫放飼等による害虫総合防除技術の開発に関
する先駆的業績

Science and Technology for Agriculture, Forestry and Fishery which conserves the Environment

Reasons for Award:

Pioneer Contributions in the Development of
Integrated Pest Management by the Sterile
Insect Release Method and other biological
approaches

フロリダ州立名誉教授 1909年3月生まれ

ニプリング博士は、1931年以来、農業昆虫学者とし
て家畜害虫の研究に精励するとともに、家畜や農作物の
害虫防除に関して環境を重視した先駆的防除理論を提案
し、食糧生産の安定に尽力した。特に、1931年米国西
南部で猛威をふるっていたラセンウジバエ防除のために
「不妊虫放飼法」を提案し、ラセンウジバエの根絶防除
に画期的な成功をおさめた。

同博士は、1953年以来環境と両立する害虫防除法の
確立に努め、「総合防除法」を提唱し、一貫して環境に
悪影響を及ぼさない害虫管理体系を目指し、国際的に理
論・実践の両面において指導的な役割を果たした。

Dr. Edward F. Knipling has devoted himself for the
research on insect pest as a agricultural entomologist
since 1931. He proposed the truly original idea of
environmentally friendly pest control by suppressing the
insect population in agricultural crops and domestic
animals. Accordingly, he made outstanding
contributions to the improvement of food production. He
developed a new concept of insect pest control known
as the "sterile insect release method". In 1931 he
attained great success in eradicating the screwworm fly,
a serious and sometimes fatal pest of livestock in the
Southwest region of the United States. From 1953, he
made important contributions to the development of an
environmentally sound method of insect pest control. He
proposed and played a key role in promoting Integrated
Pest Management. He played a leading role in scientific
research and in application of his findings in terms of
pest control without harming the environment.

人類はこの50年程の間に、科学の進歩によって、農作物の害虫や人間の健康、快適さに有害な昆虫類の防除に有効な化学合成殺虫剤を作り出すことに成功し、大きな恩恵を受けたのである。

しかし、これら化学合成殺虫剤の大量使用は、それらの多くが広い殺虫活性を持っているために、食料生産や環境に対する負荷について大きな関心が寄せられるところとなった。

そのため、害虫管理に携わる世界中の研究者達は、このような負荷のない害虫防除法開発に向けて集中的に研究を開始したのである。その場合、大半の研究者達は、現在製造販売されている利用可能な殺虫剤の安全な使用方法について研究したが、少数の研究者達は全く別種の安全な害虫防除法を求めて研究を進めた。この新領域の研究によって、多くの昆虫誘引物質や、害虫抵抗性植物が発見・開発されたし、昆虫病原微生物、寄生性昆虫、捕食性昆虫などを利用する生物的防除法の研究も進められた。彼らはまた、不妊虫放飼法のような新しい防除法も開発した。

動物（主に家畜）の重要害虫であるラセンウジバエの根絶と密度管理に関する不妊虫放飼法の目覚ましい成功は、1950年代および1960年代に達成され、その後はこの新害虫防除法を他の種々の重要害虫にも適用するための研究がなされた。この防除法はチチュウカイミバエや世界各地のその他のミバエ類に対しても、根絶や拡散防止に極めて有効であることが証明されたのである。日本の研究者達は、沖縄において果菜類の重要害虫であるウリミバエの根絶に成功した。この不妊虫放飼法は、アフリカではツェツェバエに対して、殺虫剤によって自然の個

体群密度を下げた後に適用されているし、その他の害虫防除にもこのような条件のもとでの適用が可能である。しかし、この環境に好ましい害虫防除技術も、広い意味では一般的な害虫対策としては受け入れられなかった。

しかし、このような現象は、その他の新しい防除法についても言えることである。一方、生物学者達は、寄生性昆虫、昆虫病原微生物などに関する豊富な新しい知識・情報を得るに至ったのである。昆虫の誘引物質に関する研究がその顕著な例である。しかし、害虫防除法としては、広い活性スペクトルをもつ殺虫剤が相変わらず優勢的に使用されている。殺虫剤のより一層安全な使用を目指したIntegrated Pest Management=IPM（総合的害虫管理）という害虫管理システムをもたらした。しかし、実際に展開されたこのシステムは、個々の農家の判断により作物ごとに、または圃場ごとに用いられる防衛的手段なのであった。そしてこの手段は害虫の個体群動態（生息密度の変動）との関連でいえば根本的な弱点をもっている。すなわち、多くの害虫がうまく増殖する機会を得ると、たちまち再び通常の密度に戻ってしまうからである。残念ながら、現在利用できる各種の殺虫剤に対する代替防除法の多くは、害虫密度が高いレベルに達した時には使えないか、使っても効果の遅さや害虫の移動性などにより頼りにならないのである。このような諸々の理由から、効果的で生態学的に望ましい害虫防除法の出現は大幅に停滞したままであった。

「必要な新戦略」

私は長い間、害虫個体群を予防的に制御管理できる安全で実用的な方法が開発され

るならば、主要な害虫問題に対する画期的合理的な防除手段となるだろうということを考えてきた。不妊虫放飼法はこの可能性を持っているのである。しかし、その効果が害虫の密度に逆依存的（＝害虫密度が高いと効果が弱くなる）に働くことや、広域的に適用しなければ効果が少ないことなどから、研究者達には大きな限界があると考えられてきた。さらには、一般の害虫防除の場面において、農業関係や環境問題関係者のリーダーといわれる人達は個々の農家が害虫に対して殺虫剤による対処手段を持っているかぎりには、改まって新しい大規模な広域的害虫防除事業を実施する必要性を感じていないようである。このような事情から、広域的で予防的な手段についての考え方は受け入れられないできた。にもかかわらず私は、種々の害虫防除手段について、単独使用の場合や併用または総合的に用いた場合の抑圧効果やその特徴について解析を続けてきた。これらの研究成果が、我々は環境にやさしく、そして経済的になりつつ手段によって多くの重要害虫の個体群を生態学的な基礎研究に基づき、確実に管理制御するために必要な基本技術を持っているという確信を私に与えてくれたのである。

不妊法およびその他の遺伝的操作、そして天敵昆虫の効果増進法などは、少ないコストで広域的に害虫個体群を管理するには有効な方法である。この二種類の方法は幾つもの類似の特徴を持っている。これらは、何れも「動く生物そのもの」を利用するものであるし、隔離されていない地域での実用は無理があるとされている。双方ともに害虫への抑圧効果は密度依存性であるため、害虫密度がすでに被害水準に達している時には限界があるが、この害虫個体群密度が

被害をもたらすレベル以下に保持されている時には極めて有効で実用的である。これこそが予防的な害虫管理システムの目的なのである。また、最も重要なことは双方とも特定の昆虫種のみを標的とするもので、このような或る特定の昆虫種だけに有効な手法によって害虫を管理することは、適用範囲の広い殺虫剤の出現以来の害虫管理研究者達の第一の目標であり、さらに、非選択的害虫防除技術による環境負荷から逃れるための希望であった。

「将来展望」

こんにち、地球規模では、農業は農耕地の減少が顕著に進行するなかで、爆発的に増大する人口を支えるに十分な食料を生産しなければならぬという途方も無い困難な局面に立たされている。そのうえ、人類は食料の安全性とともに生存する地球環境の安全性を強く要望している。

この目標を達成するためにわれわれは、害虫防除の手段を、殺虫剤の使用を基本とする後進的な害虫管理法から、生物学的方法により経済被害水準以下に害虫個体群密度を保持するよう計画されたコストの少ない前進的予防システムに変更しなければならない。そのためには、必要とする不妊虫や天敵など昆虫種の大量増殖や、効果的な放飼技術を開発する必要がある。幸いにも、自然は我々に基本的な道具—害虫それ自身と数百に及ぶ天敵昆虫—を新しい害虫管理システムに使用可能な材料として与えてくれているのである。すでに、必要な昆虫の増殖については多くの研究者が取り組んでいる。過去の例からすると、研究者達が適切な予算、資源、技術等を得るのに何の障害もないということはないのであるが、こ

の種の研究への投資は、その結果将来受けるであろう経済的・環境的恩恵に比べるとはるかに小さなものである。

結論として、効果的で有力かつ安全な害虫管理技術を求める道は、世界中の害虫管理研究者が挑戦している課題である。これまでに多くの研究業績があり、生物的害虫防除法の原理や概念が示されてきていることから、私は、今日の科学技術によってすでにわれわれは、世界中の主要な害虫を、効果的に、そのうえ環境に安全で、しかも経済的にも合理的な方法で管理制御するための知識や基礎技術をすでに得ているか、または技術を容易に開発可能な段階に到達していると確信している。

AREAWIDE MANAGEMENT OF INSECTS BY THE STERILE INSECTS TECHNIQUE AND OTHER BIOLOGICAL MEANS

Edward F. Knippling

Science achieved a breakthrough in the discovery and development of many highly effective synthetic chemical insecticides that makes it possible to control most of the insect pests that attack agricultural production and the comfort and health of people. These developments during the past 50 years have been of great benefit to humankind throughout the world.

But the intensive use of these synthetic chemicals, most of which have broad-spectrum activity has been a matter of grave concern to many people over the potential hazards they create to food and the environment.

Therefore, pest management scientists throughout the world began intensive investigations to develop ways to control insect pests that do not create such hazards. Many of the scientists concentrated their efforts on safer ways to use the insecticides available, while others concentrated their efforts on alternative but safer ways to control insects. Renewed efforts were made to develop various kinds of insect attractants and to develop resistant host plants. Special attention was given to biological control procedures such as the use of insect microbial agents, parasites, and predators. They also explored new approaches such as the sterile insect technique.

The spectacular success of the sterile insect technique for the eradication and management of the screwworm, a serious animal parasite, was achieved in the late fifties and sixties and led to considerable research to develop this new insect control procedure for other important insects. The technique proved to be effective for eradicating or preventing the spread of the

medfly and other fruit flies in various parts of the world. Scientists in Japan eliminated the melon fly, an important pest of vegetables, from Okinawa. The technique is being used in a limited way in Africa to eliminate tsetse flies after high populations are first reduced by the use of insecticides. The technique also has limited use or looks promising for other insect pests. But when viewed from a broad perspective, this environmentally desirable control procedure thus far has not been used against a wide range of insect pest problems.

However, the same can be said for other alternative control methods. Biologists have obtained a wealth of new information on insect parasitism and insect pathogens. Research on insect attractants has been outstanding. But the use of broad-spectrum insecticides has continued to dominate insect pest control procedures. Safer and more judicious use of insecticides has come into being by a system of management referred to as Integrated Pest Management (IPM). But the system that has evolved is largely a defensive-reactive procedure that is used on a farm-by-farm and crop-by-crop basis at the discretion of individual farmers. But, this procedure has fundamental weaknesses when related to the dynamics of insect pest populations. It gives the more dynamic species every opportunity to reproduce successfully until they reach their normal population levels. Unfortunately, most of the more promising and environmentally acceptable alternative procedures are either impractical to use after the pest populations have reached high levels, or they do not give dependable results because of slow action or insect movement factors. Thus for the most part

the advances that have been made on other more ecologically desirable ways to control insects have remained largely stagnated.

"New Strategies Needed"

I have long had the view that preventive measures would offer more rational ways to deal with major insect pest problems if practical and safe methods of regulating insect populations could be developed. The sterility technique offered possibilities, but its density dependent suppression action and the necessity to use the technique on an areawide basis were regarded by many scientists as serious limitations. The pest management community in general and many of the agricultural and environmental leaders in both the public and private sectors seemed not to see the necessity of undertaking large scale areawide programs so long as farmers have the means of dealing with most insect pest problems by the use of insecticides. Thus, the concept of areawide preventive control procedures for the most part has been rejected. Nevertheless, I have continued to analyze the suppression characteristics of various alternative insect control methods when used alone and when integrated. The results of these investigations have convinced me that we have all the basic technology needed to rigidly manage populations of many major insect pests on an areawide basis by environmentally benign and economically sound procedures.

The sterility and other genetic manipulations and the parasite augmentation techniques in particular offer outstanding opportunities for managing insect pest populations on an areawide basis at low costs. The two techniques have a

number of similar suppression characteristics. They both involve the use of mobile biological organisms, which virtually rules out their practical use on a small scale in unisolated areas. But this is one of the most desirable characteristics when used on an areawide basis. Both techniques have density-dependent suppressive actions. This limits their usefulness when pest populations have already reached their damage levels, but this makes them highly effective and practical for maintaining pest populations below significant damage levels. This is the very objective of preventive pest management systems. Most importantly both techniques are virtually target pest specific. To achieve pest management by pest specific means has been the primary goal of pest management scientists since the new broad-spectrum insecticides came into being and the hope of those concerned over the environmental consequences of non-selective pest control methods.

"Outlook for the Future"

The time will come - and very soon - when agriculture worldwide will be faced with the monumental task of producing enough food for the expanding world population. And this will have to be accomplished on diminishing agricultural lands. Nevertheless, people will - and should - demand that this be accomplished without undue risks to the safety of the food we eat and the safety of the environment in which we live.

To accomplish this, we must change from reactive pest management procedures based on the use of insecticides to low cost proactive

preventive systems designed to keep pest populations below significant damage levels using biological means. This will require development of efficient procedures for mass producing and releasing the needed biological organisms. Fortunately, Nature has already given us the basic tools - the pests themselves and hundreds of parasite species - that can be used in augmentation systems. Admittedly, producing the many organisms required will be a major challenge for insect rearing scientists. However, based on their past achievements, I am confident they will experience few obstacles, given appropriate resources. The investment in such research will be minimal compared with the large economic and environmental benefits that will be realized.

In conclusion, effective, efficient and safe ways to control our major food competitors is the challenge that insect pest management scientists worldwide must meet in the years ahead. Based on years of research and investigations into the principles and concepts of biological insect pest control procedures, it is my conviction that science already has or can readily develop the information and basic technologies that will be needed to manage most of the world's major insect pests in an effective, environmentally safe and economically sound manner.